

吴健芳,王红梅,田自强.信江流域底泥重金属溯源与评价[J].江西师范大学学报(自然科学版),2023,47(6):599-604.

WU Jianfang, WANG Hongmei, TIAN Ziqiang. The tracing and evaluation of heavy metals in sediment of Xinjiang River Basin [J]. Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science), 2023, 47(6):599-604.

文章编号:1000-5862(2023)06-0599-06

# 信江流域底泥重金属溯源与评价

吴健芳,王红梅\*,田自强

(中国环境科学研究院水生态环境研究所,北京 100012)

**摘要:**目前江西省信江流域(鹰潭段冶炼区)支流的底泥重金属底数不明,给地方生态风险评价及污染治理带来不确定性.为解决该区域在环境管理中的不足,该文构建了污染物工业排放耦合系数 $f_{CCPE}$ 指标,用以评估污染物排放的底泥压力并佐证了底泥重金属的来源,结合传统的地累积指数及潜在生态风险指数评估了金属冶炼区周边灌溉水底泥的重金属污染程度.研究结果显示:在冶炼区周边底泥中各种金属 $f_{CCPE}>1$ ,这表明冶炼厂周边的底泥重金属主要来源于铜冶炼活动;在各村镇底泥中 Cu 含量由大到小依次为长塘村( $421.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )>邱家村( $164.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )>江南村( $134.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )>黄坑村( $101.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )>龙石村( $40.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )>版上村( $14.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).在各村镇底泥中 Cu 和 Pb 比的 $f_{CCPE}$ 值由大到小依次为邱家村(8.13)>长塘村(7.94)>江南村(3.69)>黄坑村(3.50)>龙石村(3.12)>版上村(0.68).地累积指数表明金属冶炼区在周边底泥中 Cd 处于轻度污染;在灌溉水底泥中重金属 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 生态危害系数( $E_{i,r}$ )平均值分别为 0.55、0.67、3.53、35.12、1.45、11.17、313.87 和 4.49.综合潜在生态风险指数( $R_p$ )为 370.85,生态危害程度强.建议对风险超标的底泥及时进行管控和治理.

**关键词:**信江流域;底泥;重金属;生态风险;铜冶炼区

**中图分类号:**Q 948.5 **文献标志码:**A **DOI:**10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2023.06.07

## 0 引言

信江属于鄱阳湖水系,是江西省境内较大河流之一,其干流自东向西,流经上饶市、铅山县、弋阳县、贵溪市、鹰潭市、余江县、余干县等区域.流域周边分布着大量的金属矿脉.部分地方借助于资源优势,传统产业以金属冶炼为主,鹰潭—贵溪段尤为突出,生产规模排行世界第 2 的贵溪铜冶炼厂位于该区域,它始建于 20 世纪 80 年代,坐落于信江干流的贵溪市.该区域的产业以铜冶炼为核心,逐步发展为铜循环产业链,以铜冶炼为主,以铜制品深加工等产业为辅.由于历史管理薄弱,铜冶炼产业废水、废气排放存在不规范的现象,所以地方重金属污染隐患较大.重金属在土壤、底泥中蓄积,通过种植、灌溉等途径进入生物体,其潜在生态环境风险不可小

觑<sup>[1-2]</sup>.底泥重金属水平直接影响着底栖生物的分布、生长和种群组成<sup>[3-4]</sup>.掌握底泥污染物水平及风险,实现科学溯源对地方的环境风险防范具有重要意义,它不仅可以直接影响地方的管理决策,而且有力地支撑流域精准地水污染防治项目(底泥疏浚与修复)设计、科学地规划水体功能分区、合理地水资源调配等活动.然而,目前尚无信江流域鹰潭—贵溪段底泥的相关数据,为弥补以上空白,本研究针对该区域底泥重金属开展风险评价与溯源,以期对地方水环境管理、治理提供科学依据.

## 1 材料与方

### 1.1 研究区概况

鹰潭市地处信江中下游、江西省东北部.研究区

收稿日期:2023-11-01

基金项目:科技部重点研发计划课题(2021YFC1809104)资助项目.

通信作者:王红梅(1971—),女,北京海淀区人,研究员,博士,主要从事新型环境风险评估及管理应用技术研究.E-mail:wanghmjxj@163.com

位于亚热带湿润季风气候区,气候温和,降雨充沛,且四季分明.研究区常年平均气温为 18 ℃,极端最低气温为-9.3 ℃,极端最高气温为 41.0 ℃,相对湿度为 76%,常年主导风向为东风、东北风.年均降雨量为 1 750.0 mm,最大日降雨量为 214.4 mm.

本课题组于 2022 年 1—6 月对研究区域环境现状、土地利用现状、污染源等进行调研.调研结果发现研究区涉重企业共 43 家,其空间分布如图 1 所示,主要集中于信江流域两侧.该区域土地类型主要有工业区和农业区,农业区紧邻工业区.区域产业以铜冶炼为核心先导,随后逐步形成金属的冶炼、深加工、循环利用特点的产业链.冶炼区的涉重金属排放企业有冶炼、采矿、循环加工等类型;非冶炼区的涉重企业有电镀、采矿、废旧金属循环回收等类型.本课题组通过现场访谈、勘察和查阅项目环评、监测报告等收集排放源信息,包括企业工艺特点、产能负荷、排放源、排放强度等.

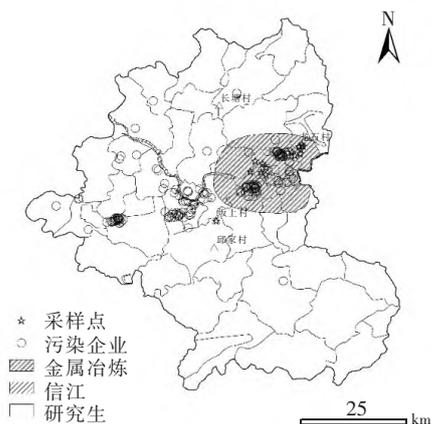


图 1 研究区及样本点示意图

## 1.2 样品采集与处理

相关研究报道表明贵溪市的环境重金属水平较高<sup>[5]</sup>.初步分析其成因可归结为早期环境管理较为薄弱、铜冶炼企业存在着废水库建设防渗不到位、废水和废渣管理不规范、大气排放量大等行为.冶炼区周边均为农田,且灌溉水主要来源于信江支流.

本研究采样时间为 2022 年 1—6 月,灌溉水底泥采样空间位置如图 1 所示.采集了 14 个样本,均为支流灌溉水底泥,水深 0.4~1.0 m.将采集样品装于专用容器中,标明编号等采样信息,做好现场记录,随后送检.样品在经风干研磨过 100 目筛后待测,检测项目为 Pb、Cd、Cu 等重金属,由具备 CMA/CNAS 认证的中国海关技术中心检测,使用仪器 ICP-MS (美国,PerkinElmer NexION 350X 型)测定,

测定参照执行标准 GB 15618—2018 进行.

## 1.3 统计分析

使用 SPSS 18.0 进行数据统计分析,获得重金属的相关性分析,在统计学意义上使用  $P < 0.01$  或  $P < 0.05$ ;使用 ArcGIS10.5 进行数据空间分析,并绘制空间分布图.

## 1.4 评价指标

1.4.1 污染物排放耦合系数(coupling coefficient of pollutant emission, CCPE)法 通常 CCPE 被用来反映工业排放产生的环境压力,结合污染物空间分布耦合进一步对污染开展来源解析.

本研究通过环境压力系数  $f_{CCPE}$  来进行分析,固定排放源在生产工艺相对稳定的情况下结合污染物空间分布特征,探究工业活动对污染物空间分布的影响程度.通过对固定排放源进行排放特征分析,选择在污染物 ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ ) 中排放量稳定、影响较大且呈现比例的行业特征污染物,构建行业排放压力系数(如  $C_1/C_2$ ).另外,选择在环境介质(土壤、积尘或底泥)中同样的 2 种污染物的比值 ( $C_1/C_2$ , CCPE 系数)构建  $f_{CCPE}$ ,即

$$f_{CCPE} = (C_1 - C_{1BKG}) / (C_2 - C_{2BKG}),$$

在环境空间的同一地理位置上,对污染物  $C_1$  和  $C_2$  进行系数构建应当注意: $C_1$  为与主要排放企业工艺相关,且为排放量第 1 大的污染物, $C_{1BKG}$  为相应的环境背景值; $C_2$  为与主要排放企业工艺相关,且排放量仅次于第 1 的污染物, $C_{2BKG}$  为相应的环境背景值. $C_1$  和  $C_2$  均属于固定生产工艺排放源污染物的种类.要求  $C_1$  的排放量大于  $C_2$  的排放量.

$f_{CCPE}$  指标可反映通过不同途径排放的  $C_1$  和  $C_2$  对环境造成的压力程度.在工业活动频繁的区域  $f_{CCPE}$  理论值大于 1,且  $f_{CCPE}$  值越大表示工业活动对地方环境造成的压力越严重.本研究选择底泥  $f_{CCPE}$  值,借助于  $f_{CCPE}$  指标来判断工业活动对底泥的重金属负荷的影响,由此可为底泥重金属溯源提供支撑,并通过对其相关性分析来开展溯源.

## 1.4.2 地累积指数(Geo-accumulation Index, $I_{geo}$ )

地累积指数又被称为 Muller 指数,综合考虑了自然土壤形成过程以及人为活动对各重金属污染产生的影响.因此, $I_{geo}$  通常被用来区分人为活动对重金属污染影响以及自然成土过程地质背景的影响.其计算公式<sup>[6]</sup>为

$$I_{geo} = \log_2(C_n / (kB_n)),$$

其中  $C_n$  为在沉积物中重金属含量的实测值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $B_n$  为在研究区沉积物中重金属的背景值

( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),本研究为江西省土壤重金属背景值, $k$ 为修正岩石运动引起背景值波动而设定的系数( $k=1.5$ ).地累积指数法一般按污染程度由清洁到极重污染分为 7 个污染等级(见表 1).

表 1 地累积指数分级

地累积指数( $I_{\text{geo}}$ )	$\leq 0$	(0,1]	(1,2]	(2,3]	(3,4]	(4,5]	$>5$
分级	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	清洁	轻度	偏中度	中度	偏重度	重度	极重

1.4.3 潜在生态风险指数法 潜在生态风险指数法<sup>[7]</sup>是在综合考虑重金属含量和生物毒性的基础上,引入了毒性响应系数,用于评估重金属污染物对生态环境的潜在影响.该方法将重金属污染物的环境效应、生态效应与毒理学有机结合,能够全面地反映了多种重金属污染物对生态环境的影响潜力.生态风险指数的计算公式为

$$R_i = \sum_{i=1}^n E_{i,r} = \sum_{i=1}^n T_{i,r} C_{i,f} / C_{i,n}$$

其中  $R_i$ (risk index)为各重金属的综合生态风险指数,无量纲; $E_{i,r}$ 为重金属元素  $i$  的潜在生态风险系数,无量纲; $T_{i,r}$ 是重金属元素  $i$  的毒性系数,无量纲; $C_{i,f}$ 为重金属元素  $i$  的实测含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); $C_{i,n}$ 为重金属元素  $i$  的土壤背景值( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),此处选

取江西省土壤背景值.

根据  $R_i$  和  $E_{i,r}$  值的大小,潜在生态风险指数划分标准如表 2 所示.

表 2 潜在生态风险划分标准

生态危害程度	轻微	中等	强	很强	极强
潜在生态风险系数 $E_{i,r}$	$<40$	[40,80)	[80,160)	[160,320)	$\geq 320$
潜在生态风险指数 $R_i$	$<150$	[150,300)	[300,600)	$\geq 600$	

## 2 结果

### 2.1 底泥重金属现状及来源

在研究区底泥中 12 种重金属的含量如表 3 所示.其中重金属 Cu 的含量较高,在研究区的各村庄底泥中 Cu 含量由大到小依次为长塘村( $421.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )>邱家村( $164.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )>江南村( $134.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )>黄坑村( $101.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )>龙石村( $40.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )>版上村( $14.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).在冶炼区周边的长塘村、邱家村、江南村、黄坑村和龙石村的底泥中重金属的含量高于在非冶炼区的版上村的底泥中重金属的含量.

表 3 采样点底泥重金属的含量平均值

重金属	邱家村	长塘村	龙石村	版上村	江南村	黄坑村
V	10.80	16.29	12.38	19.60	13.74	19.44
Cr	6.11	18.66	9.77	16.36	12.81	15.28
Mn	92.28	203.23	76.85	135.55	162.53	365.32
Co	3.22	4.02	1.84	4.03	3.94	7.11
Ni	28.55	11.08	4.61	10.67	8.99	16.59
Cu	164.07	421.91	40.11	14.59	134.76	101.23
Zn	98.20	182.38	40.49	43.32	129.40	105.02
As	15.82	29.49	4.49	5.01	7.41	7.49
Mo	1.80	3.00	0.33	0.28	0.66	0.51
Cd	0.64	2.31	0.59	0.15	1.71	0.87
Sb	1.90	16.87	0.60	1.56	1.40	1.34
Pb	20.17	53.12	12.85	21.32	36.48	28.90

在研究区底泥中 12 种重金属的相关性分析如表 4 所示.结果表明在底泥中重金属 Cu 与 Zn、As、Mo、Cd、Sb、Pb 的空间分布高度相似.在底泥中 Pb 与 Cu、Zn、Cd 的空间分布高度相似.相关性研究表

明在底泥中 Cu、Pb、Zn、Cd 等重金属在含量上呈现出正相关关系,空间分布趋势基本一致.进一步分析底泥 Cu 与 Pb 的系数  $f_{\text{CCPE}}$ ,各村镇  $f_{\text{CCPE}}$  值由大到小依次为邱家村(8.13)>长塘村(7.94)>江南村(3.

69) > 黄坑村 (3.50) > 龙石村 (3.12) > 版上村 (0.68). 本研究系数  $f_{CCPE}$  由铜冶炼的特征污染物铜与铅构成, 在铜冶炼活动中 Cu 为最主要的排放类型, 系数  $f_{CCPE} > 1$  的区域表示以铜冶炼活动为主的污染影响区域. 结果显示: 位于冶炼区周边的邱家村、

长塘村、江南村、黄坑村 4 个村镇采样点的系数  $f_{CCPE}$  均大于 1, 这表明冶炼区周边的底泥重金属 Cu 和 Pb 来自工业活动的影响, 而非冶炼厂周边的版上村不受冶炼工业排放的影响.

表 4 底泥重金属含量的相关系数

重金属	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Sb	Pb
V	1.00	0.77**	0.48	0.63*	0.16	-0.14	-0.24	-0.08	-0.07	-0.38	0.05	-0.09
Cr	0.77**	1.00	0.37	0.49	0.05	0.11	-0.07	0.17	0.17	-0.11	0.35	0.10
Mn	0.48	0.37	1.00	0.94**	0.57*	-0.01	0.20	0.11	0.00	-0.09	0.11	0.02
Co	0.63*	0.49	0.94**	1.00	0.64*	0.01	0.21	0.10	0.02	-0.07	0.07	0.08
Ni	0.16	0.05	0.57*	0.64*	1.00	0.18	0.28	0.38	0.36	-0.05	0.11	0.05
Cu	-0.14	0.11	-0.01	0.01	0.18	1.00	0.84**	0.89**	0.83**	0.75**	0.78**	0.88**
Zn	-0.24	-0.07	0.20	0.21	0.28	0.84**	1.00	0.65**	0.53*	0.88**	0.47	0.91**
As	-0.08	0.17	0.11	0.10	0.38	0.89**	0.65**	1.00	0.97**	0.52*	0.91**	0.61*
Mo	-0.07	0.17	0.00	0.02	0.36	0.83**	0.53*	0.97**	1.00	0.43	0.89**	0.51
Cd	-0.38	-0.11	-0.09	-0.07	-0.05	0.75**	0.88**	0.52*	0.43	1.00	0.39	0.85**
Sb	0.05	0.35	0.11	0.07	0.11	0.78**	0.47	0.91**	0.89**	0.39	1.00	0.49
Pb	-0.09	0.10	0.02	0.08	0.05	0.88**	0.91**	0.61*	0.51	0.85**	0.49	1.00

注: \*\* 为在 0.01 水平(双侧)上显著相关, \* 为在 0.05 水平(双侧)上显著相关.

2.2 底泥重金属污染程度

在底泥中重金属地累积指标评价结果如表 5 所示. 根据  $I_{geo}$  分级标准(见表 1), 邱家村、长塘村、龙石村、版上村、江南村、黄坑村底泥重金属 V、Cr、Mn、Co、Mo 的  $I_{geo}$  平均值均小于 0, 这说明这几种重

金属总体处于清洁状态. 邱家村、长塘村、龙石村、版上村、江南村、黄坑村底泥重金属 Cd 的地累积指数分布在 0~1 范围内, 这表明该区域底泥 Cd 属于轻度污染. 另外, 相比于长塘村、龙石村、版上村、江南村、黄坑村, 邱家村的 Sb、Ni、As 处于重度污染.

表 5 底泥重金属地累积指数 ( $I_{geo}$ )

重金属	邱家村	长塘村	龙石村	版上村	江南村	黄坑村
V	-0.27	-0.32	-0.28	-0.35	-0.29	-0.35
Cr	-0.28	-0.51	-0.35	-0.47	-0.40	-0.45
Mn	-0.48	-1.07	-0.45	-0.66	-0.87	-0.65
Co	-0.46	-0.54	-0.34	-0.54	-0.54	-1.06
Ni	426.83	-0.73	-0.38	-0.71	-0.60	-2.38
Cu	0.42	0.27	-48.01	-0.91	0.83	1.11
Zn	-13.17	1.22	-0.77	-0.80	-2.10	2.44
As	50.01	1.09	-0.56	-0.61	-1.52	-1.00
Mo	-0.25	-0.30	-0.15	-0.15	-0.18	-0.17
Cd	0.48	0.25	3.75	95.82	0.41	0.49
Sb	7.15	0.30	-0.67	-7.09	-0.70	1.00
Pb	-0.80	7.05	-0.53	-0.85	-0.34	-12.84

### 2.3 底泥重金属的潜在生态风险

在底泥中各重金属潜在生态风险评估结果如图2所示.在研究区灌溉水底泥中重金属Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Pb的潜在生态风险值( $E_{i,r}$ )平均值分别为0.55、0.67、3.53、35.12、1.45、11.17、313.87和4.49.总体而言,研究区综合潜在生态风险指数( $R_f$ )值为370.85,其表现出生态危害程度强.

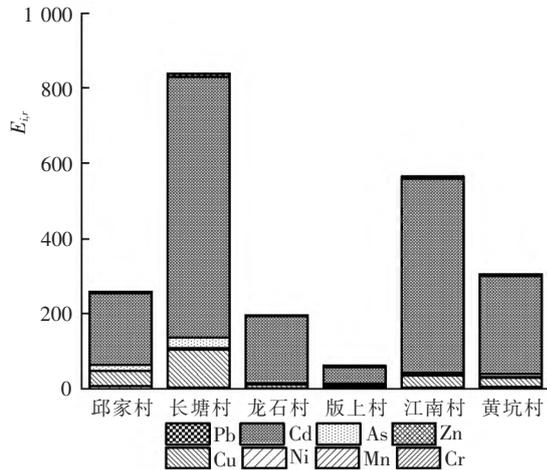


图2 潜在生态风险指数

## 3 讨论

### 3.1 在冶炼区周边的灌溉水底泥中重金属污染现状及来源解析

在底泥或沉积物中的污染物含量反映了一段时期工业或人类活动干扰影响程度.信江流域(鹰潭段)是典型的铜冶炼区之一,相关研究表明铜冶炼排放的主要特征污染物为Cu、Pb、Zn和Cd等<sup>[8]</sup>.研究结果发现信江干流的冶炼区附近村庄灌溉水底泥Cu含量偏高(见表3):长塘村 $421.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、邱家村 $164.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、江南村 $134.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、黄坑村 $101.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、龙石村 $40.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而非冶炼区的版上村灌溉水底泥Cu含量仅为 $14.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .对比国内相关研究,发现在冶炼区周边底泥中Cu含量要远高于在非冶炼区周边底泥中Cu含量<sup>[9]</sup>.另外,对比在同类型冶炼区周边底泥中重金属含量,发现在研究区长塘村底泥中Cu含量比在北江底泥中Cu含量高4倍<sup>[10]</sup>.由此可见,鹰潭段的铜冶炼污染物对底泥的影响较大.重金属的空间分布表明底泥Pb与Cu、Zn、Cd空间分布趋势高度相关,Cu、Pb、Zn、Cd可能来自同一污染源(见表4).该结果不仅佐证了底泥Cu来源于金属铜冶炼活动,同时也说明在底泥中的其他重金属受到铜冶炼影响.为进一步探明铜冶炼活动的影响区域,本

研究构建了污染物排放耦合系数 $f_{\text{CCPE}}$ 以反映冶炼活动对环境影响的压力.该系数的构建理念来源于地累积指数( $I_{\text{geo}}$ )<sup>[11]</sup>.地累积指标直接将在沉积物中扣除环境影响值的重金属含量作为累积效应,而 $f_{\text{CCPE}}$ 反映与特定工业活动输入的污染物的程度. $f_{\text{CCPE}}$ 适用于工业活动类型较为固定、排放的污染物较为稳定的区域,鹰潭—贵溪冶炼区就适用这一类型.工业排放的污染物对环境的压力将与 $f_{\text{CCPE}}$ 密切相关, $f_{\text{CCPE}}$ 波动的高低反映污染物对环境压力的大小.研究结果发现在底泥中Cu与Pb的 $f_{\text{CCPE}}$ 值由大到小依次为邱家村(8.13)>长塘村(7.94)>江南村(3.69)>黄坑村(3.50)>龙石村(3.12)>版上村(0.68).冶炼区周边村庄的 $f_{\text{CCPE}}$ 值均大于1,这进一步说明这些村庄的底泥重金属受到周边金属冶炼业活动的影响.相比之下,非冶炼厂周边的版上村 $f_{\text{CCPE}}$ 值仅为0.68,这说明其底泥重金属可能来自其他人为或自然环境的干扰.

### 3.2 地累积指数评价结果

本研究采用 $I_{\text{geo}}$ 评估了在底泥中重金属污染程度(见表5).研究结果显示在长塘村灌溉水底泥中重金属V、Cr、Mn、Co和Ni地累积指数平均值均小于0,这表明该5种重金属整体处于清洁状态;Cu、Cd和Sb的地累积指数分布在0~1之间,这表明该3种重金属处于轻度污染程度;Zn、As的 $I_{\text{geo}}$ 值处在1~2范围内,这表明该2种重金属偏中度污染,属于2级污染;Pb的 $I_{\text{geo}}$ 值大于5,处于重度污染.龙石村、版上村和江南村的底泥计算结果显示,除重金属Cd外,其他重金属V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Mo、Sb和Pb的 $I_{\text{geo}}$ 平均值均小于0,这表明研究区流域总体处于清洁状态.另外,研究区各村庄重金属Cd的地累积指数由大到小依次为版上村(95.8)>江南村(3.75)>龙石村(0.41),3个村镇分别属于极重、偏重度和轻度污染状态.版上村虽然不在冶炼区内,但底泥Cd的 $I_{\text{geo}}$ 值为95.82,属于极重污染状态,此外,其 $f_{\text{CCPE}}$ 值为0.68,可以判定在研究区域底泥中重金属Cd可能有其他输入途径,后续应该加强对其来源进行研究.黄坑村灌溉水底泥重金属Zn、Cu、Cd和Sb的 $I_{\text{geo}}$ 值分别为2.44、1.11、1.00、0.49,相应地处于中度、偏中度、轻度、轻度污染的状态;重金属V、Cr、Mn、Co、Ni、As、Mo、Pb总体均处于清洁状态.结果表明铜冶炼活动加重了周边村庄灌溉水底泥重金属的污染程度.

### 3.3 潜在生态风险评价结果

相关研究广泛通过潜在生态风险指数评估底

泥重金属富集产生的风险<sup>[12]</sup>,在本研究区域各村庄底泥中重金属潜在的生态风险评估结果如表 6 所示.研究结果显示邱家村灌溉水底泥重金属 Cr、Mn、Zn、Pb、Ni、As 和 Cu 等的潜在生态危害系数  $E_{i,r}$  均小于 40,这表明邱家村生态危害程度处于轻微风险状态,但在采样点中 Cd 的潜在生态危害系数达到 191.27,这说明其生态危害程度处于很强风险状态,该村重金属产生的综合生态风险  $R_i$  值为 258.61,处于中等生态风险.长塘村的灌溉水底泥重金属 Cu、Cd 潜在生态风险系数分别为 101.42 和 693.83,生态危害程度分别处于强风险、极强风险状态,而其他重金属 Cr、Mn、Ni、Zn、As、Pb 的  $E_{i,r}$  均小于 40,该村重金属产生的综合生态风险  $R_i$  为 839.00,处于极强风险状态.在研究区的龙石村、版上村、江南村、黄坑村灌溉水底泥的 8 种重金属中,除 Cd 的潜在生态风险系数  $E_{i,r} > 40$  外,重金属 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 均处于轻微风险程度.这 4 个村庄综合生态风险指数分别为 196.22、61.62、564.67 和 304.96,生态危害程度分别为中等、轻微、强、强风险状态(见图 2).综上所述:重金属 Cu 和 Cd 是在研究区灌溉水底泥中主要污染物,其中 Cd 产生的潜在生态风险不可忽视.铜冶炼活动增加了信江贵溪段支流周边村庄的底泥重金属的负荷水平,并给地方生态环境产生一定的威胁.另外,非冶炼区周边灌溉水底泥 Cd 污染也要引起重视,应该尽快查明其来源.地方政府相关部门应该及时制订重金属减排及监管计划,在有效控制排放的同时,对已确定存在风险的底泥进行彻底地清淤、疏浚及生态修复,及时消除内源性污染.

## 4 结论

本文采用传统的地累积指数评价法以及生态风险指标法评估了在信江流域主要冶炼区域的底泥中重金属污染程度,并构建了污染物排放耦合系数  $f_{CPE}$  来反映工业排放的环境压力指标.研究结果表明冶炼区的铜冶炼活动是造成鹰潭局部支流底泥重金属含量增加的主要原因.为保障冶炼区周边流域的生态环境健康,环境管理部门应科学开展制订重金属减排、内源性污染清淤计划.

## 5 参考文献

[1] 陶美娟,周静,梁家妮,等.大型铜冶炼厂周边农田区大气重金属沉降特征研究[J].农业环境科学学报, 2014,33(7):1328-1334.

- [2] JIANG Xiawei, LIU Wenhong, XU Hao, et al. Characterizations of heavy metal contamination, microbial community, and resistance genes in a tailing of the largest copper mine in China [J]. Environmental Pollution, 2021, 280: 116947.
- [3] MU Lan, HU Ruizhong, BI Xianwu, et al. New insights into the origin of the World-Class Jinding sediment-hosted Zn-Pb deposit, southwestern China: evidence from LA-ICP-MS analysis of individual fluid inclusions [J]. Economic Geology, 2021, 116(4): 883-907.
- [4] 赵思颖,倪才英,符文昌,等.鄱阳湖流域底泥微生物对环境变量的响应[J].江西师范大学学报(自然科学版), 2016, 40(2): 194-199.
- [5] 周静.重金属污染土壤修复技术的现状和展望:以江西贵溪冶炼厂周边区域土壤修复示范项目为例[J].世界环境, 2016(4): 48-53.
- [6] SIDDIQUI E, PANFEY J. Assessment of heavy metal pollution in water and surface sediment and evaluation of ecological risks associated with sediment contamination in the Ganga River: a basin-scale study [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(11): 10926-10940.
- [7] DUAN Kaixiang, ZHAO Baowei, ZHANG Songlin, et al. Contamination characteristics, source analysis, and ecological risk assessment of toxic metals and metalloid in agricultural soil in Yuzhong, China [J]. Journal of Environmental Quality, 2021, 50(1): 122-133.
- [8] LEUNG H M, CHEUNG K C, AU C K, et al. An assessment of heavy metal contamination in the marine soil/sediment of Coles Bay Area, Svalbard, and Greater Bay Area, China: a baseline survey from a rapidly developing bay [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(17): 22170-22178.
- [9] 杨卓,李贵宝,王殿武,等.白洋淀底泥重金属的污染及其潜在生态危害评价[J].农业环境科学学报, 2005, 24(5): 945-951.
- [10] 吕文英,汪玉娟,刘国光.北江底泥中重金属污染特征及生态危害评价[J].中国环境监测, 2009, 25(3): 69-72.
- [11] SRIVASTAVA B, REDDY P B. Application of geoaccumulation index ( $I_{geo}$ ) as a tool to assess the heavy metal contamination in the agricultural fields of chambal river at NAGDA, UJJAIN (M. P. INDIA) [J]. Life Sciences International Research Journal, 2020, 7(1): 70-75.
- [12] YU Zhenzhen, LIU Enfeng, LIN Qi, et al. Comprehensive assessment of heavy metal pollution and ecological risk in lake sediment by combining total concentration and chemical partitioning [J]. Environmental Pollution, 2021, 269: 116212.

(下转第 614 页)

*Tamarix-Gramineae* shrub communities decreases as the distance from the center of the shrub and/or the soil depth increases, with the maximum value 0.376. As the distance from the center of the shrub increases, the soil enzyme activities of *Tamarix-Suaeda* shrub communities reduce and then increase, at the same time, increase and then decrease as the soil depth increases, with the maximum value 0.271. Urease activity is significantly concentrated at the canopy and the canopy edge of the *Tamarix-Gramineae* communities, and the maximum concentration factors are 1.68 and 1.47, respectively. However, there is no significant enrichment of soil enzyme activity in the *Tamarix-Suaeda* community. Catalase activity in *Tamarix-Gramineae* and *Tamarix-Suaeda* shrub communities all increase and then decreased as the soil depth increases, and maximum values are 1.352 and 1.602, respectively. As the distance from the center of the shrub increases, they exhibit different patterns, and the maximum values are 1.2 and 1.3, respectively. There is no significant enrichment of catalase activity in the two types of *Tamarix* shrub communities. The soil enzyme activity of the two types of *Tamarix* shrub communities has a significant positive correlation with soil moisture, soil organic carbon, pH and negative correlation with electric conductivity (EC). *Tamarix* shrub communities have certain aggregation to enzymes, which is conducive to constructive community succession and provides data support for ecological sustainability and soil improvement in the Yellow River Delta region.

**Key word:** *Tamarix*; shrub; Yellow River Delta; enzyme activity; succession

(责任编辑:刘显亮)

(上接第 604 页)

## The Tracing and Evaluation of Heavy Metals in Sediment of Xinjiang River Basin

WU Jianfang, WANG Hongmei\*, TIAN Ziqiang

(Department of Water Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012)

**Abstract:** The profiles of heavy metals in branch sediment around the Xinjiang river basin's tributaries (Yingtang smelting area) in Jiangxi are unknown still, which brings rather confusion on assessing the ecological risk and controlling the pollution. To make up the deficiencies of the management, index of pollutant emission coupling coefficient  $f_{CCPE}$  is created, which can be used to reflect the environmental pressure from the industrial emissions, along with the traditionally indexes both geo-accumulation ( $I_{geo}$ ) and ecological risk are taken to evaluate the pollutant levels. The findings reveal that indexes  $f_{CCPE}$  coefficient  $>1$  is mainly located in the smelting area, indicating that heavy metals in the sediment around the smelting plant are affected by industrial activities. The levels of sediment's Cu of the villages are listed as follow: Changtang ( $421.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), Qiuqia ( $164.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), Jiangnan ( $134.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), Huangkeng ( $101.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), Longshi ( $40.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and Banshang ( $0.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Index  $I_{geo}$  shows that the sediment Cd around the smelting area is slightly polluted, and the average values of the potential ecological hazard coefficients ( $E_{i,r}$ ) of the heavy metals Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd and Pb in the irrigation sediment are 0.55, 0.67, 3.53, 35.12, 1.45, 11.17 and 313.87, respectively, with the whole ecological risk index 370.85 that is a strong ecological hazard level. It is suggested that the sediment with excessive risk should be controlled and treated in a timely manner.

**Key words:** Xinjiang River Basin; sediment; heavy metals; ecological risks; copper smelting area

(责任编辑:刘显亮)